簡介農作物光譜—
植被光譜特徵與作物生長性狀之關係

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊◎農試所農藝組　陳榮坤　楊純明

前　言

作物在田間生長發育過程中，隨著時間的進展，其植被在不同的生育時期將出現形態及結構上的時間變異。儘管處於相同生育時期，作物植被亦可能遭受氣象變化、土壤變異、人為栽培管理及病蟲危害等環境因子影響而改變，呈現植被形態及結構上的空間變異。因此，探討農作物在生產過程中的生長狀態，生長性狀的時空變化與變異，將有助於對栽培管理措施及環境影響產生效應的瞭解，從而經由評估衍生出因應對策，謀取農作物生產的最大效益。遙測技術係為快速而非破壞性監測大面積農田生長狀態的最佳工具之一，其原理主要在於篩檢及建立生長性狀相關的光譜特徵模式（即光譜遙測模式），並進一步應用於估測與追蹤農作物的生育和時空變異。

一、遙測技術與作物植被光譜的關係

遙測技術係利用非接觸的方法如對光或熱感測等技術，感測物(形)體及其所處狀態，此種功能及特性在農業領域上具有廣泛應用潛力。肇始於 1972 年 Landsat 衛星順利發射升空開始，在原有可見光照像(相)之外，更加上多光譜掃描感測器(MMS, mutispectral scanner)進行地表狀態的監測，使得遙測技術邁向新的里程碑。

遙測技術在地面植被的監測上，可以進行探索與探討植被種類、作物相分佈、覆蓋比例、生長狀況及周遭環境等，據以進行各種評估和作業規畫。在農業生產方面，諸如植株生育進展的追蹤、植體光合作用活動力的觀察、病蟲害發生與危害的監測、雜草蔓延與分布的評估、灌溉流程與控制的掌握及產量的估測與預測等，都可利用遙測技術達到快速、大面積且非破壞性的偵(檢)測，使得適時適地適法從事農作物及土壤的經營與管理成為可行，進而達到穩定且提高農作物生產目的。

光譜遙測為遙測技術的一種，主要藉著被測物反射光譜的光譜特徵，來辨識與判讀被測物當時所處的狀態。近年來具備窄波段(narrow band)掃描能力的超高頻譜感測器(hyperspectral sensor)逐漸受到重視，其發展及未來潛力不容忽視。超高頻譜感測器之頻寬約 2-10 nm，主要涵蓋 350-2500 nm 間(或 350-3000 nm)的波長範圍，可以提供詳細而連

作者：陳助理研究員榮坤
聯絡電話：04-23302301-144

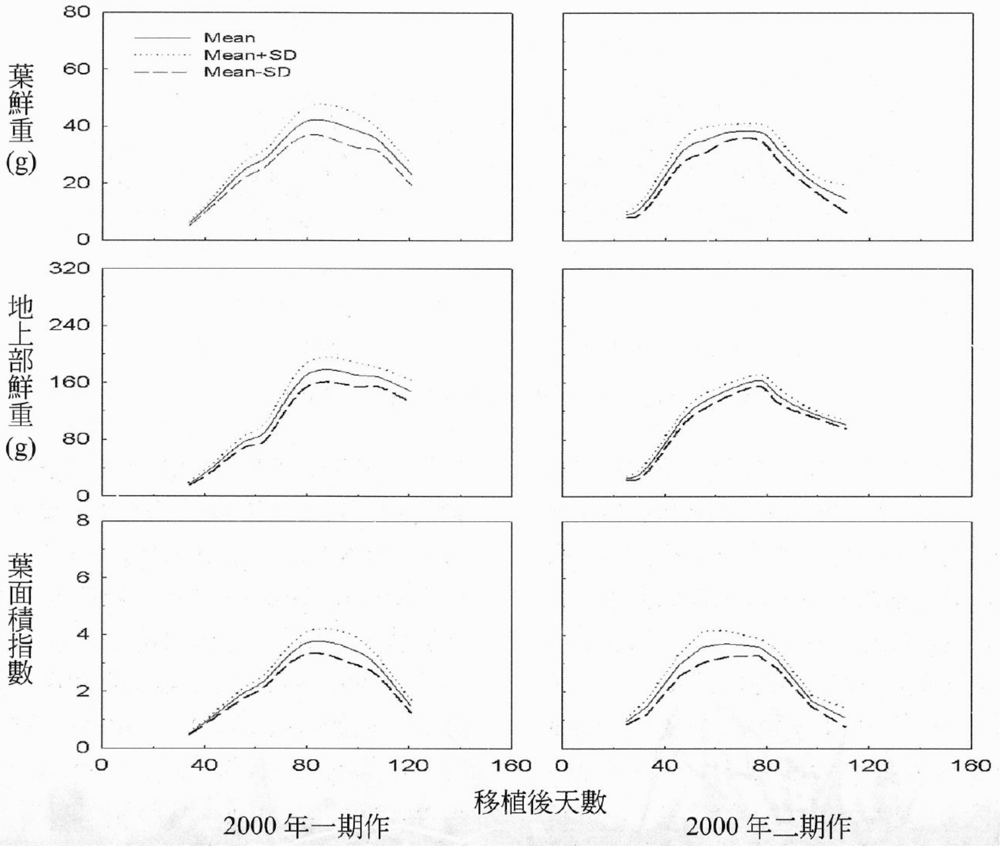
續的被測物高解析光譜資料。由這些豐富的光譜資料，吾人可定義出植被中各種性狀的光譜特徵(spectral signatures or spectral characteristics)，並可依照各窄波段位置與其反射比間的關係描繪出反射光譜曲線，再加以區別不同植被外觀徵狀或植體生理狀態與不同光譜特徵的關係。

由於不同農作物體內所含物質及植體構造並不相同，因此對入射光源(田間以太陽光輻射爲主)的吸收、穿透及反射往往有不同的表現，反射光譜當然也互異，這就是辨別及判識的依據。Yang 等學者(1998a,1998b, 1999)曾針對水稻近地面植被光譜進行偵監，指出由水稻反射光譜所計算之標準差植被指數(NDVI, normalized difference vegetation index)與葉面積指數(LAI, leaf area index)、葉片乾重及地上部乾重間呈現曲線關係，建議可利於此等關係進一步來估測與追蹤水稻生長狀態。因此，若能建立生長性狀的光譜特徵模式，合理描述和解釋作物的生長表現，即可作爲栽培管理的依據。本文綜合作者近年試驗結果，試以水稻爲例介紹植被光譜特徵與作物生長性狀之關係，並推及其可能之應用。

二、水稻生長性狀及植被光譜在全生育期的變化

水稻自插秧移植後，隨著分蘗數的增加，葉片的伸展及植株的伸長，使葉鮮重、地上部鮮重及 LAI 逐漸增大。一期作約於抽穗後(移植後 90 天左右)、二期作約於抽穗前(移植後 71 天左右)達到生長最高峰，再因邁入生殖生長及成熟老化等過程而逐漸降低，全生育期間呈現曲線分布(圖一)。此與 Yoshida 等學者(1968)所述，LAI 值隨稻株生長而增大，至抽穗期時因有最大的上位五枚葉片而達到最大值，抽穗後因下位葉片逐漸死亡而導致 LAI 值漸減的結果一致。其中二期作由於生育初期的高溫抑制分蘗，使分蘗期提早停止，且單位時間內生長快速，營養生長期縮短而較一期作更早達到抽穗期。

作物植株之色澤、形態及結構隨著生育進展而異，亦受到周遭土壤條件、氣象環境及人爲栽培管理差異的影響。此一結果勢將改變族群植被之吸收、反射及穿透等光學特性，並綜合反應在植被反射光譜上的多樣變化。圖二是 2000 年一、二期稻作生育期間定期偵測之水稻族群植被反射光譜之三維動態變化(three-dimensional dynamic variations)，由參試田區計算出之反射光譜平均值曲線之時間序列顯示，水稻族群植被光譜係動態的，光譜曲線不僅因時而異，其不同波長反射比也隨著波段而改變。比較全生育期各光譜波段，紫外光(350-400 nm)及可見光波段(400-740 nm)之反射比較低；近紅外光波段(740-1300 nm)、短波紅外光波段(1300-1800 nm)及中波紅外光波段(1800-2500 nm)較高，且其高低落差甚大。造成各光譜波段反射比高低差異的原因，除了不同波段光輻射之能量有別之外，尚受到植體色素及結構影響。一般言之，高能的紫外光(＜ 400 nm)多穿透植體，反射率低；可見光(400-740 nm)反射率大部份決定於光合色素的多寡，光合色素濃度愈高、活性愈強，吸收率愈高；近紅外光(740-1350 nm)受葉內構造的影響較大，葉內細胞壁、細胞間隙及充塡其內的水分均具對近紅外光反射，使呈高反射率；中紅外光1350-2500 nm)則多被植體水分吸收，而呈現低反射比(Puritch, 1981)。



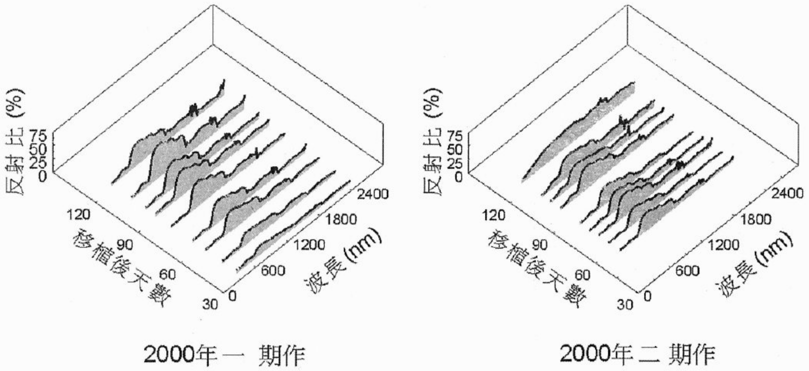
圖一、2000 年一、二期稻作全生育期之生長性狀表現分佈

在水稻全生育期的反射光譜變化中，可發現隨著生育的進展，可見光波段反射比逐漸降低，近紅外光波段反射比逐日增高，約於抽穗期分別達到最低及最高點。抽穗後光譜反射比的變化與抽穗前相反，光譜曲線逐日趨於平緩。無論可見光或近紅外光波段，反射比變化趨勢均呈現約略以抽穗期作為分隔點的曲線分布，其與全生育期的生長性狀曲線相似，顯示在全生育期中光譜反射比的動態與水稻生長性狀的變化分佈之間具有相關性，乃繼續深入探討。

三、水稻族群植被光譜與生長性狀間的關係

雖然具備窄波段掃描能力的超高頻譜感測器可以提供詳細而連續的光譜資料，但是如何從繁雜的光譜資訊中簡化、歸納終至篩檢出有用的光譜特徵波段，以精確估測植體生長狀態，則是光譜遙測技術的重要研究內容及方向。本文續以植被指數(vegetation index)闡述如何連結光譜特徵與生長性狀，建立兩者之關係。

在光譜遙測研究上，為探討農作物種類、LAI 或植體鮮重等植體性狀與植被光譜

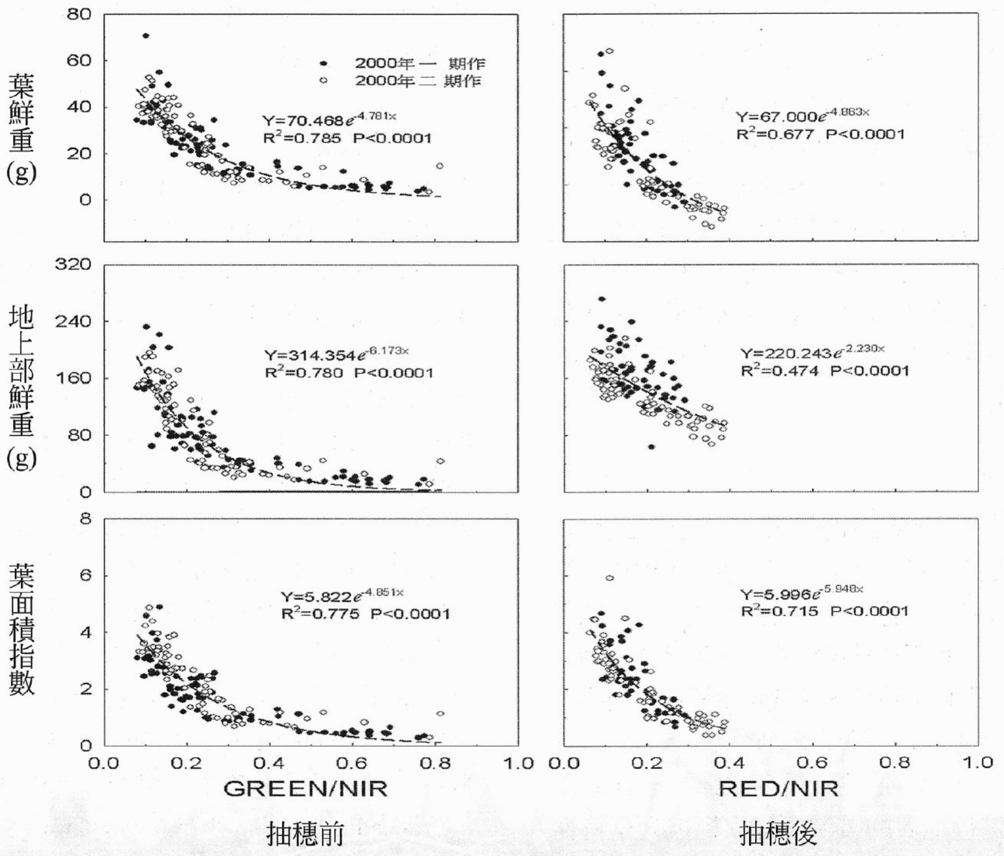


圖二、水稻全生育期間植被反射光譜三維動態變化

的關係，常自植被光譜中篩選出不同特徵波段(長)組合成綜合指數，稱之爲植被指數或植生指數。此爲最早使用的光譜分析方法，源自於前述衛星承載的多光譜掃描感測器，由具有意義的波段組合作爲評估植體狀態的指標，並藉以降低各種不確定因素(如不同土壤背景或其它環境因子等)的干擾(Bouman, 1995)。此種方法的光譜波段大多以可見光(400～700nm)及近紅外光(700～1300nm)波段爲基礎，以 1-3 個光譜特徵利用波段之間符合羅輯的數學運算(如和、差、比値等)，建立植被指數與作物植被(體)特性之關係模式。1969 年 Jordan 以紅光與近紅外光反射比的比値(RVI, ratio vegetation index)作爲植體健康與否的指標，可說是使用植被指數的創始者。Rouse *et al.* (1974)進一步提出 NDVI 指數以估測植體狀態，更受到廣大迴響，到目前爲止 NDVI 仍然受到廣泛的研究與使用。

由於水稻生長性狀與光譜變化均約略以抽穗期爲頂點呈現曲線分布，因此稻株全生育期生長性狀及光譜資料均以抽穗日(抽穗率達 50%以上)爲分隔點，切割爲抽穗前及抽穗後兩時期進行統計分析。此一作法不僅正確區隔生長性狀與植被指數之實際變化，更因此連結兩者之眞正關係而提高相關性。本文以 GREEN/NIR、RED/NIR 及 NDVI(即(NIR-RED)/(NIR+RED))三種植被指數建立與水稻生長性狀的關係，結果顯示三種植被指數均與水稻生長性狀呈現指數函數關係，且相關顯著。抽穗前以 GREEN/NIR 對三種生長性狀的關係最佳，其決定係數(coefficient of determination, R^2)分別爲 0.785(葉鮮重)、0.780(地上部鮮重)及 0.775(LAI)；抽穗後則以 RED/NIR 與生長性狀間的 R^2 達到最高，分別爲 0.677(葉鮮重)、0.474(地上部鮮重)及 0.715 (LAI) (圖三)。其中 GREEN 爲光譜曲線之綠光波段反射比峰點，RED 爲紅光波段反射比谷點，NIR 則爲近紅外光波段反射比頂點。

由於此三種植被指數與生長性狀的關係均呈現指數函數關係，顯示此三種指數對於水稻生長性狀的預測有其飽和性。亦即植被指數對生長性狀的預測有其極限，達到極限之後則失去預測的功能，未能眞正反映生長性狀與植被指數的關係。Aman *et al.*(1992)也曾指出，NDVI 可對 LAI 進行預測，在 LAI ＜3 時，NDVI 與 LAI 幾乎呈直線關係；惟



圖三、水稻族群植被指數 GREEN/NIR 及 RED/NIR 與生長性狀間的關係

當LAI愈大，植冠構造漸趨複雜時，NDVI與LAI的相關性將逐漸降低。這是以可見光及近紅外光為主的植被指數進行作物性狀估測時最容易遭受的限制，因此在利用回歸關係解釋作物生長時，必須充分瞭解自變數與依變數之關係及限制，才不致於陷入統計的迷思。

除了常見的植被指數，近年來文獻中亦有利用直線複迴歸模式(MLR, mutiple linear regression analysis)估測農作物生長性狀者。此種統計方法可以排除植被光譜中的干擾因子，將數個相互獨立且對生長性狀敏感性高的特徵波段組合，構建對生長性狀更佳估測結果的光譜特徵模式。如 Thenkabail *et al.* (2000)曾利用直線複迴歸分析探討棉花、馬鈴薯、大豆及玉米等四種作物特徵波長與植體鮮重間的關係，並建議各作物分別以四個單一波長組合(368 nm, 668 nm, 925 nm and 968 nm; 511 nm, 682 nm, 711 nm and 940 nm; 353 nm,754 nm, 811 nm and 825 nm; 439 nm, 511 nm, 625 nm and 954 nm)對植體鮮重進行估測，其 R^2 可分別達到 0.79、0.80、0.81 及 0.78。作者亦曾對水稻生長進行直線複迴歸分析，先將水稻族群植被全波段光譜(350-2500 nm)與各生長性狀進行相關強度(直線相關)分

析，選出 8-10 個分屬不同波段(如藍光、綠光、紅光、近紅外光、短波紅外光及中紅外光且對生長性狀直線相關性較佳的特徵波長。經篩除共線性(collinearity)高的特徵波長後，以逐步迴歸選取模式(stepwise regression selection procedure)中的逐步選取法(stepwise selection)選 2-3 個特徵波長變數，建立具有適當相關強度之水稻生長性狀 MLR 模式，作為估測水稻生長性狀用途，請參見陳及楊(2002)和楊及陳(2003)。

四、結語

農作物生長狀態的監測是作物田間栽培管理中重要的一環，適當的作物生長不但可以提升產量及品質，也可以降低生產成本及生態環境的污染。利用非破壞性的光譜遙測技術輔助作物栽培管理，將可達到快速了解作物田間生長狀態，適時提供適當管理的目的。

過去三十年遙測技術多以衛星影像或衛星光譜進行地表的監測，建立植被光學特性與植體性狀間的關係。早期衛星影像或光譜通常只具有數個波段的光譜資料，如 Landsat 系列衛星自 450-2350 nm 波長範圍間共分為 7 個 TM 波段，其波距(bandwidth)達到 60-270 nm 之廣，所提供的光譜資訊有限，使用波段數少的植被指數因而被廣泛應用。近年來超高頻譜光譜分析儀的問世及利用，使得光譜解析力大幅提升，已經可以提供窄波段光譜的細微頻譜變化，使吾人得以詳細瞭解農作物在偵測光譜範圍內真實狀況。作者在近地面高解析光譜的研究上，已經可以提供田間農作物生長狀態的估測與預測，在配合衛星及機載遙測部分，則在空間解析力、感測器俯視角度及大氣與地理校正等立體光譜資訊連結相關問題完成探討與釐清後，即能論及大面積的廣泛應用。

五、參考文獻

Aman, A., H. P. Randriamanantena, A. Podaire and R. Forouin. 1992. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sens., Vol.30, No.2.

Bouman, B. A. M. 1995. Neth. J. Agric. Sci. 43: 413-161.

Jordan, C. F. 1969. Ecology 50:663-666.

Puritch, G. S. 1981. Can. For. Ser., For. Tech. Rep. 30. Victoria, BC, Canada.

Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. NASA/GSFC Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-371.

Thenkabail P. S., R. B. Smith and E. De Pauw. 2000. Remote Sens. Environ. 71:158-182.

Yang, C. M. and M. R. Su. 1998a. p.574-593. In: Proceeding of the 3rd Asian Crop Science Conference, April 27-May 2, 1998, Chinese Society of Agronomy. Taichung, Taiwan.

Yang, C. M. and M. R. Su. 1998b. p.A-1-1-A-1-6. In: Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing. November 16-20, 1998. National Mapping and Resource Information Authority and Asian Association on Remote Sensing. Manila, Philippines.

Yang, C. M. and M. R. Su. 1999. p.735-740. In: Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing, 22-25 November, 1999. Hong Kong.

Yoshida, S., and Ahn, S. B., 1968. Soil Science and Plant Nutrition. 14:153-161.